

MUISTIO No CFD/TERMO-13-97

pvm 15 tammikuuta, 1997

## OTSIKKO

Liukuvan hilan reunaehdon testaus

LAATIJA(T)  
Esa Salminen

## TIIVISTELMÄ

FINFLOOn implementoitua liukuvan hilan reunaehto testataan laskemalla ylisoonista virtausta virtauksessa poikittain olevan sylinterin ohi siten, että sylinterimäisistä lohkoista ulompaa on pyöritetty. Sliding-pinta sijoitetaan siten, että sylinterin eteen syntyvä tiivistysaalto kulkee sliding-pinnan yli. Vertailutilanne lasketaan käyttäen tavallista lohkoliimausreunaehto ja siten, että lohkot ovat kohdakkain. Simuloinnit tehdään kahdella eri hilatiheydellä. Harvemmalla hilalla simulointi tehdään myös ajan suhteen tarkasti.

## PÄÄKOHDAT

Tiivistysaalto kulkee siististi rajapinnan yli. Liukuvan hilan reunaehto hidastaa jonkin verran konvergenssia.

## SIVUJA

5

## AVAINSANAT

CFD, sliding mesh, rotating machinery

## TARKASTANUT

Timo Siikonen Tammikuu 10, 1997

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Staattnen simulointi</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Ajan suhteen tarkka simulointi</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Yhteenveto</b>	<b>5</b>

# 1 Johdanto

FINFLO-virtausratkaisijaan [1] on implementoitu liukuvan hilan reunaehto [2]. Implementoinnin yhteydessä uutta reunaehtoä testattiin ainoastaan kokoonpuristumattomassa pumppuvirtauksessa. Tässä muistiossa kuvataan simulointeja, joissa tutkittiin reunaehdon toimivuutta ylisoonisessa virtauksessa. Testitapaukseksi valittiin virtaus sylinterin ohi. Vastaava testi esitetään lähteessä [3].

Edellä mainitussa lähteessä testattu 'Patched-Grid'-reunaehto on monipuolisempi kuin FINFLOon implementoitu liukuvan hilan reunaehto. 'Patched-Grid'-reunaehdossa rajapinnan vastakkaisilla puolilla voi olla eri määrä laskentakoppeja eikä rajapinnan tarvitse olla sylinterimäinen. Periaatteeltaan reunaehdot ovat kuitenkin täsmälleen samanlaiset.

## 2 Staattinen simulointi

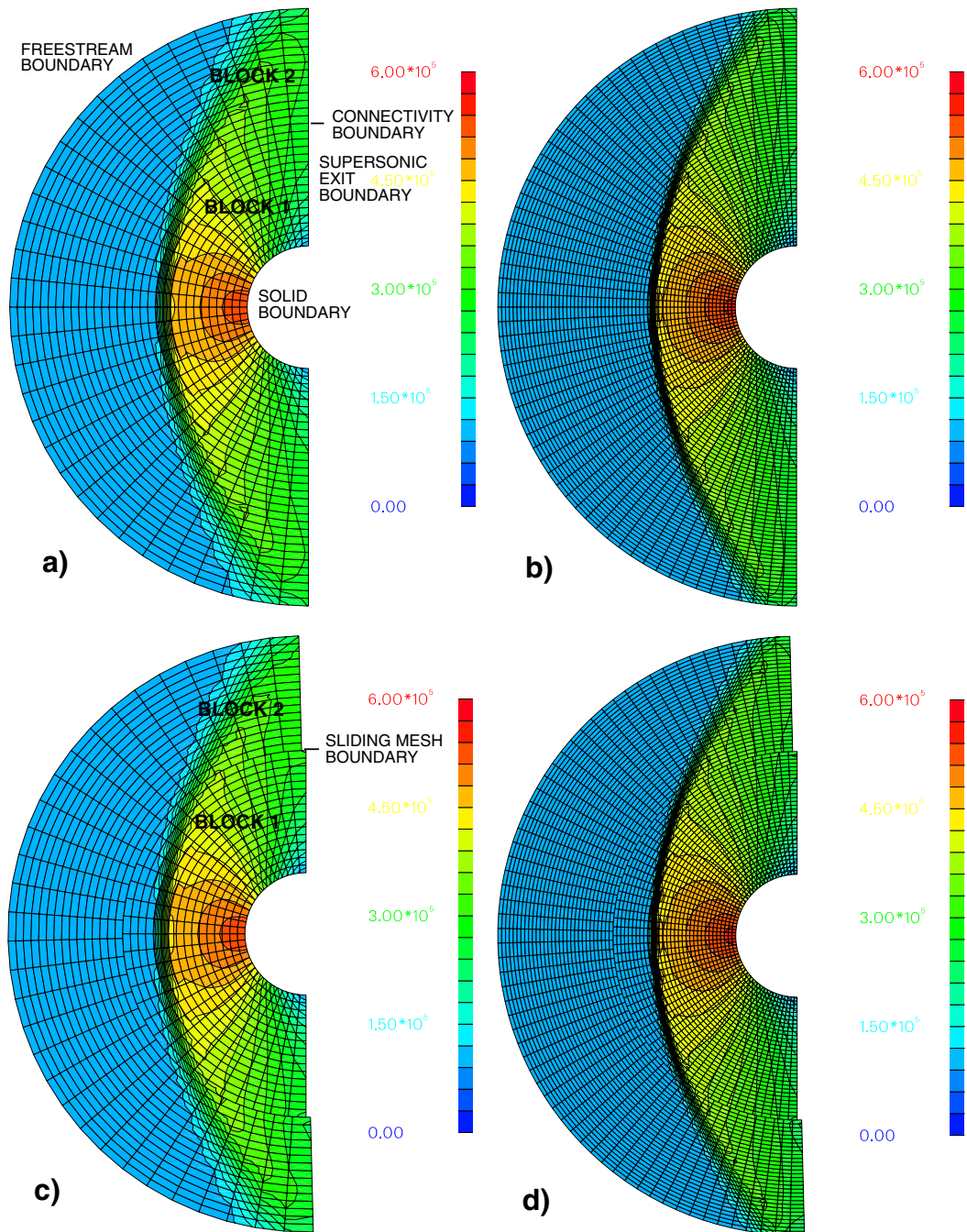
Simulointeja varten sylinterin ympärille generoitiin kaksilohkoinen hila. Kumpikin lohko on kooltaan  $64 \times 32 \times 1^1$ . Ylisoonisen ulosvirtausreunaehdon toteuttamiseksi tarvittiin lisäksi neljä  $32 \times 2 \times 1$ -kokoista apulohkoa. Käytännössä sylinterin ohi tapahtuvaa virtausta laskettaessa ei olisi mitään tarvetta käyttää kaksilohkoista hilaa puhumattakaan lohkojen kiertämisestä toisiinsa nähden. Tässä laskettava testitapaus on siis täysin epärealistinen eikä edusta tapausta, jossa liukuvan hilan reunaehtoä tyypillisesti käytetään. Reunaehdon testaamiseen tapaus soveltuu kuitenkin hyvin.

Liukuvan hilan reunaehtoä testattaessa ulompaa lohkoa kierrettiin  $1,4^\circ$  sisempään lohkoon nähden. Tiheimmällä hilatasolla ulomman lohkon säteen suuntaiset hilaviivat osuvat tällöin likimäärin sisemmän lohkon koppien keskelle. Simuloinnit tehtiin myös toiseksi tiheimmällä hilatasolla, jolloin  $1,4^\circ$  kierto vei ulomman lohkon säteen suuntaiset hilaviivat sisemmän lohkon koppien 1/4-kohtiin kehän suunnassa. Tämä asentoero ei juurikaan vaikuta lopputulokseen, mutta tiheimmällä hilalla tiivistysaalto muodostuu luonnollisestikin terävämmäksi. Kaikki simuloinnit tehtiin Euler-laskuina Machin luvulla  $Ma = 2,0$  olettaen virtaus ajasta riippumattomaksi.

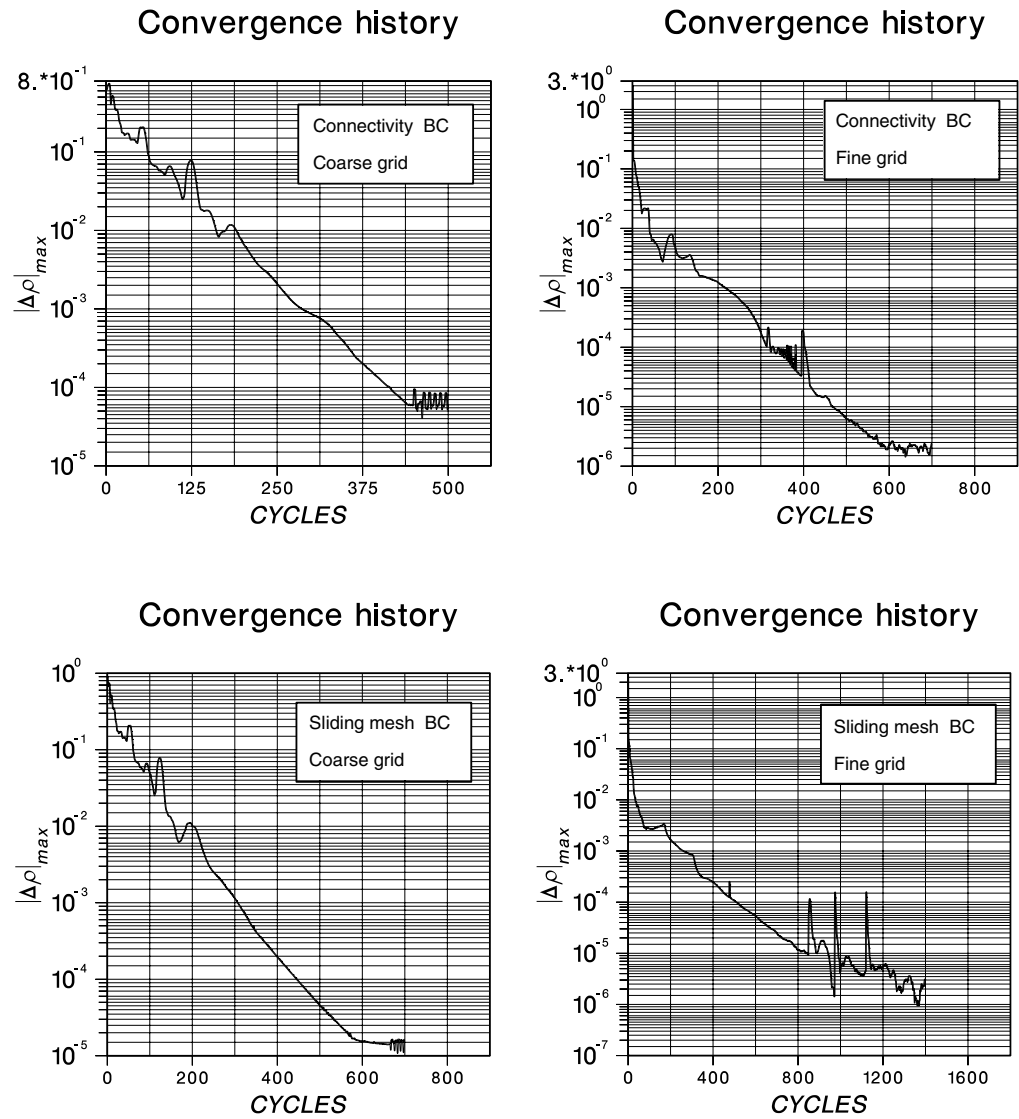
Kuvassa 1 esitetään staattisen paineen jakautumat laskettuina sekä lohkoliimausreunaehtoä että liukuvan hilan reunaehtoä käyttäen. Kuvista nähdään, että jakautumat lohkorajan yli ovat jatkuvia. Liukuvan hilan reunaehtoä käytettäessä lievää epäjatkuvuutta on havaittavissa lähellä liukuvan pinnan päitä. Häiriöitä ei voitu helposti kokonaan poistaa, sillä reunaehtoä implementoitaessa oletettiin, että pinnat, joihin sliding-pinta päättyy, olisivat aina keskenään sykliset. Tässä testitapauksessa näin ei kuitenkaan ole. Myös kohdissa, joissa tiivistysaalto menee ulos laskenta-alueesta, tapahtuu virheelistä heijastumista laskenta-alueen reunalta. Visuaalista vaikutelmaa on parannettu jättämällä harvemman hilan tapauksessa yksi kopperivi ja tiheimmän hilan tapauksessa kaksi kopperiviä laskenta-alueen ulkoreunalta piirtämättä. Myös tämä häiriö on paikallinen eikä vaikuta virtauskenttään lohkorajalla, missä uutta reunaehtoä sovelletaan.

Kuvassa 2 esitetään tiheyden maksimimuutoksen konvergenssihistoriat kussakin neljässä lasketussa tapauksessa. Kaikissa testiajoissa Courantin luvut ja monihilatasojen määrä pidettiin samoina. Courantin luvuille käytettiin arvoa 0,6 ja kummassakin lohossa käytettiin kolmea monihilatasoa. Liukuvan hilan reunaehdon havaitaan hidastavan konvergenssia. Osittain hidastuvuus aiheutunee sliding-pinnan päihin generoituneista häiriöistä.

<sup>1</sup>FINFLOn 3-D versioilla on mahdollista laskea 2-D virtausta generoimalla hila, jossa on vain yksi koppi K-suunnassa.



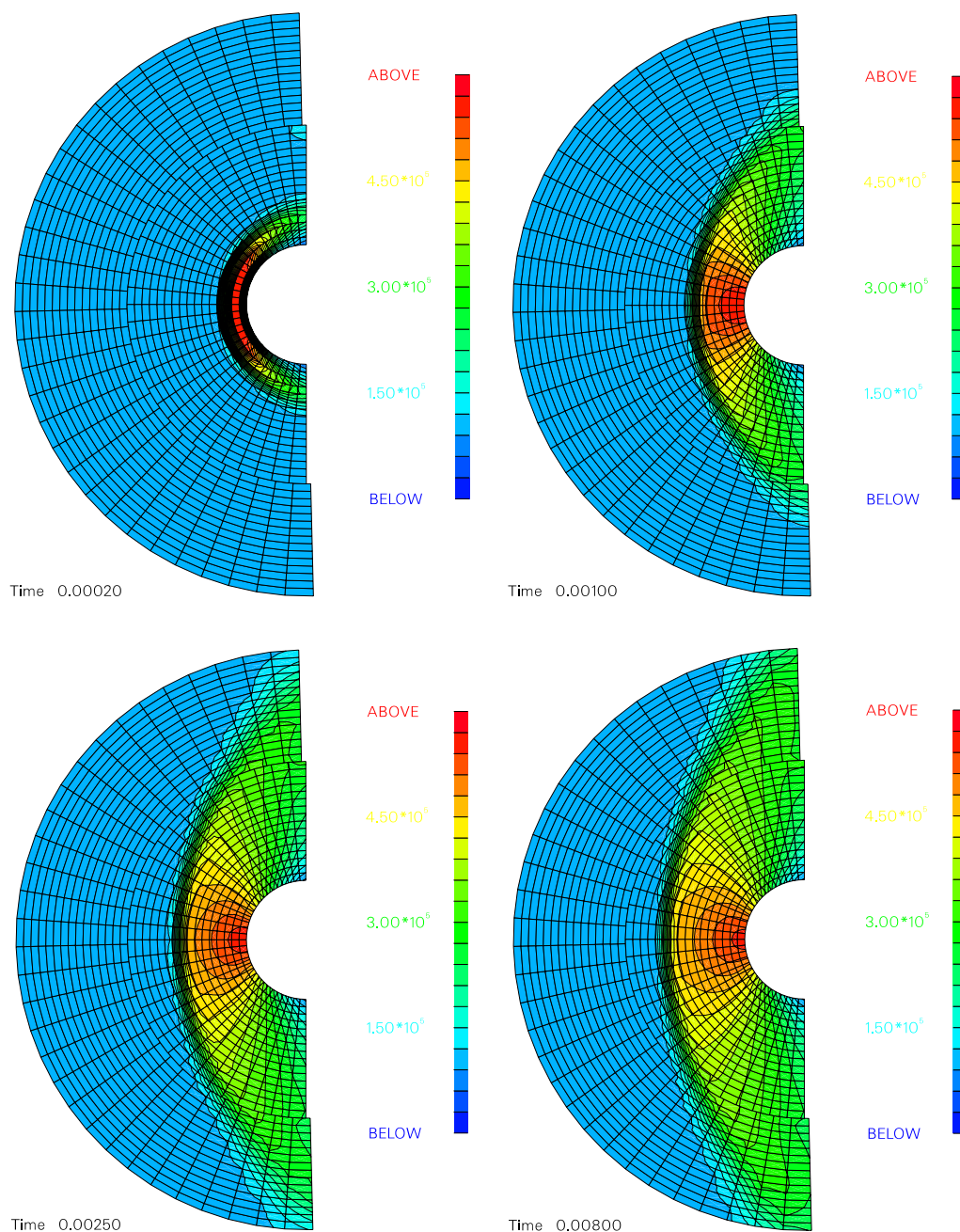
**Kuva 1:** Ylisooninen virtaus sylinterin ohi ( $Ma = 2,0$ ). Staattisen paineen tasa-arvokäyrät eri testitapauksissa: a) harva hila, tavallinen lohko liimaus (CON), b) tiheä hila, tavallinen lohko liimaus (CON), c) harva hila, liukuvan hilan reunaehto (SLD), ja d) tiheä hila, liukuvan hilan reunaehto (SLD).



**Kuva 2:** Konvergenssihistoriat eri testitapauksissa.

### 3 Ajan suhteen tarkka simulointi

Harvemmalla hilalla simulointi tehtiin myös ajan suhteen tarkasti. Kaikki virtaussuureet laskenta-alueessa alustettiin vapaan virtauksen arvoihin. Aika-askeleeksi valittiin  $0,5 \cdot 10^{-5}$  s. Kullakin aika-askeleella laskettiin maksimissaan 40 aika-askeleen sisäistä iteraatiota. Sisäisten iteraatioiden Courantin luvuille käytettiin arvoa 0,6. Painejakautuma (tiivistysaallon sijainti) neljällä eri ajan hetkellä esitetään kuvassa 3. Animaatio virtauskentän kehitymisestä on katsottavissa Internet-osoitteessa <http://www.cfdthermo.hut.fi>.



**Kuva 3:** Ylisooninen virtaus sylinterin ohi ( $Ma = 2,0$ ). Ajan suhteen tarkka simulointi. Staattisen paineen tasa-arvokäyrät neljällä eri ajan hetkellä.

## 4 Yhteenveto

FINFLOon implementoitua liukuvan hilan reunaehto testattiin ylisoonisessa virtauksessa. Testitapaukseksi valittiin virtauksessa poikittain oleva sylinteri. Käytännössä tällaisessa tilanteessa ei ole mitään tarvetta käyttää liukuvan hilan reunaehto, mutta testitapaukseksi se soveltui hyvin. Sylinterin ympärille generoitu hila jaettiin kahteen lohkokoon, joista ulompaa pyöritettiin siten, etteivät laskentakopit olleet enää kohdakkain. Lohkoraja sijoitettiin siten, että sylinterin eteen syntyvä tiivistysaalto kulki kahdessa kohdassa rajapinnan yli.

Virtauskuvio sylinterin etupuolella muodostui samaksi kuin vertailutilanteessa, jossa liukuvan hilan reunaehdon sijasta käytettiin tavallista lohkoliimausta. Virtaussuureiden tasa-arvokäyrät rajapinnan yli olivat jatkuvia lukuunottamatta aivan sliding-pinnan päitä. Näissä kohdin paikallisesti pitikin syntyä pientä virhettä, sillä ulosvirtausreunan reunaehto ei voitu näissä kohdin toteuttaa aivan tarkasti. Liukuvan hilan reunaehto on implementoitu FINFLOon siten, että käytännössä pintojen, joihin liukuva hila päättyy, täytyy olla keskenään syklisiä.

Virtauskuvion lisäksi tutkittiin myös liukuvan hilan reunaehdon vaikutusta konvergenssinopeuteen. Liukuvan hilan reunaehto käytettäessä konvergenssi oli selvästi hitaampaa kuin tavallista lohkoliimausta käytettäessä. Kaikissa testiajoissa Courantin luvut ja monihilatasojen määrä pidettiin samoina. Tiheämmän hilan tapauksessa konvergenssia olisi todennäköisesti voitu hieman kiihdyttää kasvattamalla monihilatasojen määrää yhdellä. Suhteelliseen konvergenssinopeuseroon liukuvan hilan reunaehdon ja tavallisen lohkoliimauksen välillä tällä ei kuitenkaan olisi ollut vaikutusta. Osaksi konvergenssin hidastuminen liukuvan hilan reunaehto käytettäessä saattoi aiheutua sliding-pinnan päihin generoituneista ristiriitaisista arvoista eikä itse liukuvasta pinnasta.

## Viitteet

- [1] FINFLO User Guide, Version 2.2. Helsinki University of Technology, Laboratory of Applied Thermodynamics, Espoo 1996.
- [2] *Esa Salminen*, Liukuvan hilan reunaehdon implementointi FINFLOon. Teknillinen korkeakoulu, Sovelletun termodynamiikan laboratorio, CFD-ryhmä. Muistio n:o 11-96, Otaniemi 1996.
- [3] *Man Mohan Rai*, A Relaxation Approach to Patched-Grid Calculations with the Euler Equations. *Journal of Computational Physics* **66**, 1986.